

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky

**Vliv náhrady Leonardova soustrojí
těžního stroje na napájecí síť.**

**An Analysis of the influence of Leonard's
Device within the mining machine on the
Electric grid.**

Zadání bakalářské práce

Student:

Pavel Pečínka

Studijní program:

B2648 Projektování elektrických zařízení

Téma:

Vliv náhrady Leonardova soustrojí těžního stroje na napájecí síť
An Analysis of the influence of Leonard's Device within the mining
machine on the Electric grid

Zásady pro vypracování:

Cíle – Student provede teoretický rozbor stávající situace a navrhne řešení náhrady napájení těžního stroje pomocí polovodičového měniče napětí dle požadavků zadavatele. Součástí práce je měření a analýza negativních vlivů na důlní a povrchovou síť a návrh jejich omezení. Práce bude prováděna v prostorách a dle zadání zadavatele - firmy OKD, a. s.

Obsah:

1. Rozbor stávajícího stavu vyžadujícího náhradu EP. Měření parametrů sítě pomocí analyzátoru sítě BK 300 před výměnou.
2. Srovnání efektivnosti napájení s polovodičovými měniči napětí ze sítě 22 kV vůči stávajícímu napájení Leonardova soustrojí napětím 6 kV.
3. Vliv výměny Leonardova soustrojí těžního stroje II/3 v lokalitě Staříč za polovodičový měnič napětí na povrchovou a důlní síť. Vliv výměny na důlní síť 6kV.
4. Návrh parametrů kompenzační a filtrační stanice k omezení vlivů na povrchovou síť.
5. Ekonomická rozvaha díla v cenách roku 2012 a zhodnocení přínosu zadavateli.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Čermák, T.: *Elektrické pohony*, VŠB-TU Ostrava., Ostrava 1987
- [2] Poliak F., Fedák V., Zboray L.: *Elektrické pohony*, Alfa., Bratislava 1987
- [3] VN schéma napájecí lokality
- [4] Parametry motorů TS 1 EEQ 280-55-16, výrobce ČKD Praha

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Stanislav Kocman, Ph.D.**

Datum zadání: 18. 11. 2011

Datum odevzdání: 4. 5. 2012

doc. Ing. Vítězslav Stýskala, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Ve Lhotce dne 4.5.2012



Pavel Pečínka

Moje poděkování:

Touto cestou bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Stanislavu Kocmanovi, Ph.D. z katedry elektrotechniky a Ing. Oldřichu Novákovi z firmy OKD, a.s., za pomoc při zpracování bakalářské práce, předání znalostí a odborné vedení.

VŠB-TU Ostrava
Katedra 420
Elektrotechniky

Váš dopis značky / ze dne

naše značka

vyřizuje / linka

Místo a datum

ÚTN/VE-2

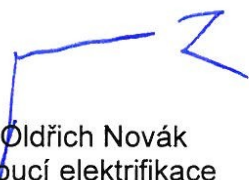
Ing. Novák Oldřich / 2227

Staříč, 4.3.2011

OKD, a.s. Důl Paskov souhlasí s tématem závěrečné bakalářské práce p. Pavla Pečínky „Vliv náhrady Leonardova soustrojí těžního stroje na napájecí síť“.

Důl Paskov poskytne potřebné podklady a případně odbornou pomoc a zařízení k jejímu naplnění

S pozdravem



Ing. Oldřich Novák
Vedoucí elektrifikace

OKD, a.s. | Prokešovo náměstí 6/2020 | 728 30 Ostrava, Moravská Ostrava
Důl Paskov | vnitřní organizační složka nezapsaná v obchodním rejstříku | Staříč č. p. 528 | 739 43 Staříč
Telefon: +420 558 491 111 | Fax: +420 558 492 555 | E-mail: dul.paskov@okd.cz | www.okd.cz

IČ: 26863154 (17) | DIČ: CZ26863154 | Bankovní spojení č.ú.: 1686578329/0800 | Česká spořitelna, a.s.
Společnost zapsána v obchodním rejstříku vedeném u Krajského soudu v Ostravě, oddíl B, vložka 2900

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá změnami v napájecí síti, které vzniknou při výměně stávajícího Leonardova měniče, za polovodičový usměrňovač.

V prvních kapitolách je uveden teoretický základ pro obě varianty, popis stávajícího stavu, důvod této výměny, změřené parametry stávajícího stavu pomocí síťového analyzátoru a jejich vyhodnocení.

Následující kapitoly obsahují předpokládaný popis nového stavu, který vznikne touto záměnou. Dále obsahují srovnání efektivností obou variant, nově vzniklé nežádoucí vlivy, ke kterým dojde po této výměně, návrh pro jejich omezení a eliminaci a cenové zhodnocení díla.

Na konci této práce je uvedeno zhodnocení přínosu, který by tato bakalářská práce měla přinést pro zadavatele bakalářské práce a pro řešitele.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stejnoseměrný motor, stejnoseměrný generátor, Leonardovo soustrojí, Leonardův měnič, polovodičový usměrňovač, povrchová síť, důlní síť, kompenzační a filtrační stanice, těžní stroj.

ABSTRACT

In this bachelor thesis, a change of a new semiconductor rectifier for a Leonard Drive System is proposed and its influence on the main power supply is analyzed.

In the first sections of the study these topics are presented; theoretical background for both drive systems, a description of the current situation, reasons for the change of the current drive system, results and evaluation of measurements of the current system, which are carried out with a power quality analyzer.

In the following sections, the proposed new drive system is introduced and a comparison of effectiveness for both drive systems is provided. Furthermore, newly emerged negative influences caused by the change of the drive systems and solutions for their elimination are presented. Moreover, an overall cost evaluation is given.

Finally, at the end of this thesis, assessments of an overall contribution of this study for both an investor and an author are provided.

KEY WORDS

DC Motor, DC Generator, Leonard Drive System, Leonard Control System, Semiconductor Rectifier, Main Power Supply, Mine Power Supply, Compensator and Filter Station, Mine Machine.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$2a$	počet paralelních větví
A	ampér
B	magnetická indukce
c	konstrukční parametr
C	kapacita
C_i	kapacita pro frekvenci i - té harmonické
C_{tot}	celková kapacita
C_v	kapacita v jedné fázi
H	Henry
h	řád harmonické
i	pořadové číslo harmonické, na kterou je obvod naladěn
I_1	proud první harmonické
i_1	okamžitý proud první fáze
i_2	okamžitý proud druhé fáze
i_3	okamžitý proud třetí fáze
i_{V1}	proud tyristorem V1
i_{V2}	proud tyristorem V2
i_{V3}	proud tyristorem V3
i_{V4}	proud tyristorem V4
i_{V5}	proud tyristorem V5
i_{V6}	proud tyristorem V6
I_a	proud kotvy
I_b	budící proud
I_h	proud h - té harmonické
J	jižní pól
j	imaginární jednotka
k	celé číslo
Kč	koruny české
kN	kilonewton
kV	kilovolt
kVA	kilovoltampér
kW	kilowatt
kWh	kilowatthodina
L	indukčnost
LC	induktivně kapacitní
L_i	indukčnost pro frekvenci i - té harmonické
L_{tot}	celková indukčnost
L_v	indukčnost v jedné fázi
M	elektromagnetický moment
m	metr
m^3	metr krychlový
min^{-1}	otáčky za minutu
mm	milimetry

MPa	megapascal
ms ⁻¹	metry za sekundu
MW	megawatt
N	počet aktivních vodičů kotvy
p	počet pulzů usměrňovače
p_p	počet pólparů
Q_c	jmenovitý jalový výkon kondenzátoru
Q_k	skutečný vykompenzovaný jalový výkon
Q_{tot}	celkový trojfázový jmenovitý jalový výkon
Q_v	jalový výkon při sníženém napětí
R_{av}	odpor vlastního vinutí kotvy
R_{kv}	odpor kompenzačního vinutí
R_p	vnější odpor
R_{pp}	odpor pomocných pólů
R_{sce}	zkratový poměr (zkratové číslo)
S	severní pól
S_{SC}	zkratový výkon v místě připojení
S_{tot}	součet výkonů nelineárních zátěží
THD_i	celkové harmonické zkreslení proudu
THD_u	celkové harmonické zkreslení napětí
U_1	napětí první harmonické
u_1	okamžité napětí první fáze
u_2	okamžité napětí druhé fáze
u_3	okamžité napětí třetí fáze
U_a	napětí kotvy
u_a	napětí v první části závitů
U_b	budící napětí
u_b	napětí v druhé části závitů
u_d	napětí na spotřebiči
$U_{d(av)}$	střední hodnota usměrněného napětí
$U_{d0(av)}$	střední hodnota usměrněného napětí při nulové řídicím úhlu
U_f	efektivní hodnota fázového napětí
U_{fm}	maximální hodnota fázového napětí
U_h	napětí h - té harmonické
U_i	indukované napětí
u_z	napětí na kotvě
V	volt
v	rychlost
var	voltampér reaktanční
α	řídící úhel
$\Delta\Omega$	změna otáček
η	účinnost
Φ	magnetický tok
Ω	otáčky, ohm
ω	kruhová frekvence sítě

Ω_0	otáčky naprázdno
ω_1	kruhová frekvence základní harmonické
ω_v	kruhová frekvence harmonické řádu i
Z	impedance
$Z(h)$	impedance h – té harmonické

OBSAH:

1. Úvod	1
2. Teoretický rozbor stejnosměrného motoru	2
2.1. Historie a popis stejnosměrného stroje	2
2.2. Základní části stejnosměrného stroje	2
2.3. Princip činnosti stejnosměrného stroje	3
2.4. Rozdělení stejnosměrných strojů podle způsobu buzení	4
3. Teoretický rozbor stejnosměrných měničů a regulace stejnosměrného motoru s cizím buzením	5
3.1. Struktura Leonardova měniče	5
3.2. Popis polovodičového usměrňovače	6
3.3. Popis a způsob regulace stejnosměrného motoru s cizím buzením	7
4. Rozbor stávajícího stavu a měření síťovým analyzátozem	8
4.1. Popis těžního stroje	8
4.2. Popis elektrické části těžního stroje	8
4.3. Popis současného stavu a důvodu výměny	10
4.4. Zapojení měření	10
4.5. Naměřené výsledky	12
5. Popis předpokládané náhrady a srovnání efektivnosti napájení	18
5.1. Popis předpokládané náhrady	18
5.2. Srovnání efektivnosti napájení polovodičovými měniči oproti současnému napájení Leonardovými měniči	19
6. Vliv výměny Leonardova soustrojí za polovodičový usměrňovač	22
6.1. Teoretický úvod	22
6.2. Zhodnocení vlivů na povrchovou a důlní síť	22
6.3. Vliv výměny na důlní síť 6 kV	24
7. Návrh parametrů filtrační a kompenzační stanice k omezení vlivů na povrchovou síť	25
7.1. Teoretický úvod	25
7.2. Návrh parametrů	26
8. Závěrečné zhodnocení a ekonomická rozvaha díla	28
8.1. Ekonomická rozvaha díla	28
8.2. Závěrečné zhodnocení a zhodnocení přínosu zadavateli	28
Literatura	30
Seznam příloh	32

1. Úvod

Tato práce se zabývá tím, jak se projeví výměna stávajícího Leonardova měniče za polovodičový usměrňovač na povrchovou a důlní síť a jaké budou prostředky pro omezení negativních vlivů, které vzniknou instalací tohoto usměrňovače.

První kapitola má název úvod a slouží k seznámení s problematikou, kterou tato práce řeší a s obsahem dalších kapitol.

Ve druhé kapitole je popsána hlavní komponenta Leonardova měniče - stejnosměrný motor, jeho historický vývoj, konstrukce a rozdělení.

Ve třetí kapitole je rozebrána funkce Leonardova měniče a polovodičového usměrňovače a způsob regulace otáček stejnosměrného motoru.

Čtvrtá kapitola obsahuje základní popis mechanických částí, popis elektrické části, popis současného stavu a důvod výměny zařízení. Dále je do této kapitoly zahrnuto měření současných parametrů a jejich vyhodnocení.

Pátá kapitola obsahuje teoretický popis předpokládané náhrady, která obsahuje uvažovanou variantu a variantu, která bude realizována. Dále je zde uvedeno srovnání efektivnosti Leonardova měniče oproti tyristorovému usměrňovači z hlediska napájení.

Šestá kapitola se zabývá srovnáním vlivu výměny Leonardova měniče na povrchovou a důlní síť. Dále popisuje důlní síť a projevy, které v ní mohou teoreticky nastat po výměně.

Šedmá kapitola obsahuje teoretický úvod k návrhu kompenzační a filtrační stanice a poté konkrétní vyjádření výpočtů a postup při konkrétním návrhu.

Závěrečná kapitola obsahuje naznačení ekonomické rozvahy a zhodnocení bakalářské práce z hlediska přínosu jak pro řešitele, tak pro zadavatele a doporučení.

2. Teoretický rozbor stejnosměrného motoru

2.1. Historie a popis stejnosměrného stroje

Stejnoseměrné stroje můžeme zařadit k nejstarším elektrickým strojům. V počátcích elektrifikace se využívaly převážně jako generátory pro výrobu stejnosměrného proudu. Ovšem s rozvojem výroby a vývojem techniky vzrostl význam především stejnosměrných motorů. Tento úpadek stejnosměrných generátorů je dán především rozvojem polovodičové techniky, kdy stejnosměrné generátory jako zdroje stejnosměrného proudu jsou zatlačovány statickými měniči. Každý stejnosměrný stroj může pracovat buď jako stejnosměrný generátor nebo jako motor. Nejsou mezi nimi žádné konstrukční rozdíly [5].

V současné době se se stejnosměrnými motory větších výkonů můžeme setkat v trakci (železniční i městské), dále také v papírenském průmyslu a velmi často v těžkém průmyslu (těžní stroje, pohony zařízení válcoven) [5].

Hlavní a nejdůležitější vlastnosti, pro které se stejnosměrné motory stále s oblibou využívají, jsou jednoduchá regulace otáček (změnou buzení), vysoký točivý moment i při nízkých otáčkách, snadná přizpůsobivost zatěžovacích charakteristik podle druhu poháněného mechanismu, poměrně vysoká momentová a proudová přetížitelnost. Ovšem v porovnání s motory asynchronními jsou konstrukčně složitější a z toho vyplývá jejich vyšší nákladnost na výrobu a údržbu [5].

Tyto motory se vyrábějí v rozsahu výkonů od jednotek wattů (např. použití v regulační technice), až do výkonů asi 7MW a napětí 1200V. Těchto mezních výkonů lze však dosáhnout pouze při nízkých otáčkách [5].

2.2. Základní části stejnosměrného stroje

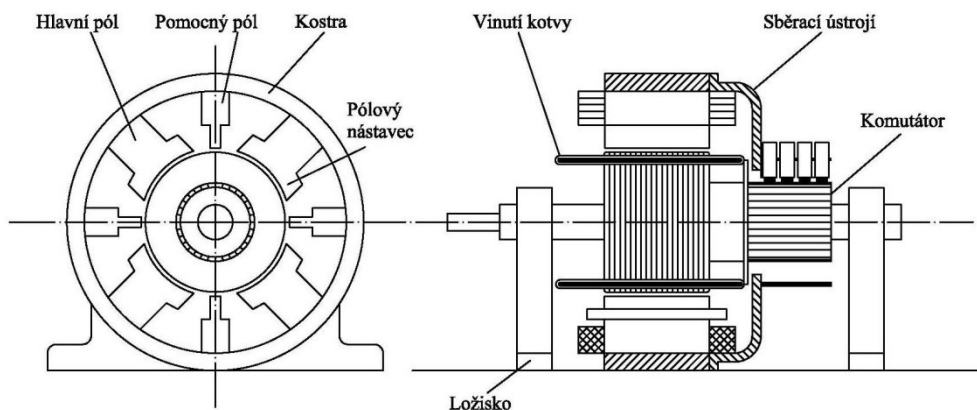
Základní části stejnosměrného stroje jsou stator (pevná část stroje), rotor (pohyblivá část stroje), sběrací ústrojí a části mající konstrukční a mechanický účel [6].

Stator je tvořen litým nebo svařovaným magnetickým věncem (jhem), z plného materiálu (ocelolity), který přímo vede magnetický tok. Na tento magnetický věnec jsou přišroubovány hlavní a pomocné póly. Hlavní póly se skládají z pólového jádra a pólového nástavce. Na hlavních pólech je umístěno budící vinutí a u motorů velkých výkonů je v pólovém nástavci umístěno vinutí kompenzační. Mezi hlavní póly jsou umístěny póly pomocné. Funkce těchto pólů je zlepšit komutaci a tím omezit jiskření na komutátoru. Póly jsou zhotoveny z neizolovaných plechů [5], [6].

Rotor je tvořen z izolovaných plechů tloušťky 0,35 – 0,5mm. Svazek rotorových plechů je nalisován na hřídeli. Po obvodu plechů jsou vylisované drážky, ve kterých je uloženo vinutí kotvy. Toto vinutí bývá provedeno buď jako závitové z drátu nebo jako tyčové z profilového materiálu. Začátky a konce cívek jsou vyvedeny a připojeny k lamelám komutátoru. Lamely jsou měděné destičky vzájemně odizolované a uspořádané do tvaru válce. Po těchto lamelách kloužou kartáče [6].

Sběrací ústrojí slouží pro přívod a odvod proudu do vinutí rotoru. Tento přenos zprostředkovávají uhlíkové kartáče, které jsou dotlačovány pružinou na komutátor. Kartáče jsou v pouzdrech, které jsou upevněny v držácích kartáčů. Tyto držáky jsou izolovaně upevněny na nosném kruhu a na kostře. Nosný kruh umožňuje otáčení kartáčů do nejvýhodnější polohy pro komutaci. Rozteč kartáčů na obvodu komutátoru odpovídá pólové rozteči. Sběrací ústrojí je umístěno na předním ložiskovém štítu a ze zadní strany vyčnívá hřídel [5], [6].

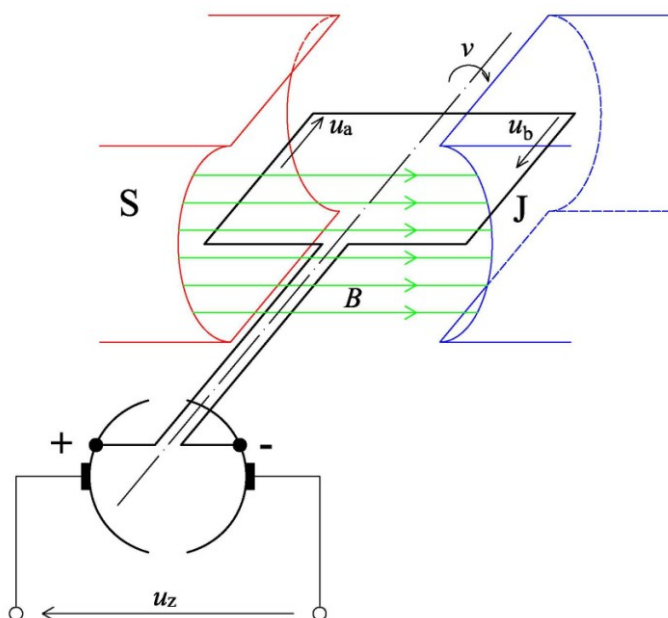
Mezi konstrukční části patří ložiskové štíty, ložiska, upevňovací patky a další díly a součásti [5], [6], [12]. Základní části stejnosměrného stroje jsou uvedeny na obr. č. 2.1..



obr. č. 2.1.
základní části stejnosměrného stroje

2.3. Princip činnosti stejnosměrného stroje

Princip činnosti je založen na elektrodynamickém účinku mezi proudy ve vodičích kotvy a magnetickým polem hlavních pólů, u stejnosměrného generátoru se využívá elektromagnetické indukce. Lze jej vysvětlit na zjednodušeném modelu, který tvoří jeden závit vinutí kotvy, připojený ke dvěma lamelám komutátoru, na které doléhají dva kartáče. Závit kotvy je umístěn mezi dvojicí permanentních magnetů. Celý model je patrný z obr. č. 2.2., který znázorňuje funkci generátoru [5].



obr. č. 2.2.
princip činnosti stejnosměrného stroje

Otáčením tohoto uvažovaného závitu rovnoměrnou rychlostí v magnetickém poli, které tvoří dva permanentní magnety, se v něm bude indukovat střídavé elektromotorické napětí. V každém vodiči závitu kotvy se indukují napětí, která mají opačnou polaritu. Výsledné napětí je dáno aritmetickým součtem těchto napětí. Střídavé napětí, indukované v závitech se usměrňuje komutátorem. Tento model slouží jen pro vysvětlení, protože v poloze, kdy je závit v rovnoběžné poloze se v závitu neindukuje napětí [5].

Pokud pracuje stejnosměrný stroj jako motor, tak je na jeho svorky připojeno stejnosměrné napětí, proudy ve vodičích závitu vytvoří dvojici sil. Tato dvojice sil začne svým momentem závit otáčet. Kdybychom tento závit napájeli pomocí kroužků, závit by se otočil jen do polohy kolmé na osu pólů a zastavil by se. Proto zde má svoji nezastupitelnou funkci komutátor, který zajišťuje změnu polarity proudu v závitu tak, že výsledný moment působí ve stejném smyslu a motor se otáčí jedním směrem [5], [6].

2.4. Rozdělení stejnosměrných strojů podle způsobu buzení

Jak již bylo uvedeno, tak každý stejnosměrný stroj může pracovat buď jako stejnosměrný generátor (dynamo) nebo jako motor. Stejnosemnné stroje můžeme také rozdělit podle toho, jak mají zapojeno budící vinutí vzhledem ke kotvě. Rozeznáváme čtyři základní druhy buzení, kterými jsou cizí buzení, derivační buzení, sériové buzení a kompaundní buzení. Popis vlastností jednotlivých zapojení je uveden pro stejnosměrný stroj, pracující jako motor [5], [13].

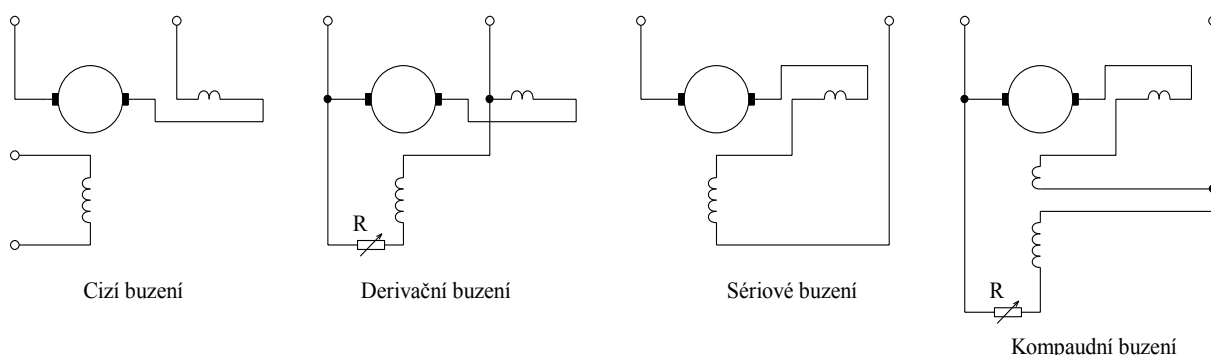
U cizího buzení je budící vinutí napájeno z externího zdroje. Toto napětí není ovlivňováno napětím kotvy. Toto zapojení vykazuje stabilní otáčky i při kolísání napájecího napětí. Používá se k pohánění strojů, u kterých se mění mechanický odpor např. u obráběcích strojů [5], [13].

Derivační buzení je co se zapojení týče, buzení paralelní. To znamená, že budící vinutí je připojeno paralelně k vinutí kotvy. Motor má menší záběrový moment, ovšem obrovskou výhodou v tom, že otáčky nejsou závislé na zatížení, ale jen na velikosti přiváděného proudu [5], [13].

Sériové buzení má budící vinutí zapojeno do série s kotevním vinutím. Se změnou zatížení se mění jak otáčky, tak i buzení motoru [5], [13].

Stejnosemnný motor kompaundní má budící vinutí zapojeno jak do série, tak taky paralelně, vzhledem ke kotvě. V podstatě spojuje vlastnosti motoru derivačního a sériového. To znamená, že motor má dosti značný záběrový moment a otáčky jsou jen málo závislé na zatížení.

Pro pochopení zapojení jsou jednotlivé druhy uvedeny na obr. č. 2.3. [5], [13].



obr. č. 2.3.
způsoby zapojení budícího vinutí

3. Teoretický rozbor stejnosměrných měničů a regulace stejnosměrného motoru s cizím buzením

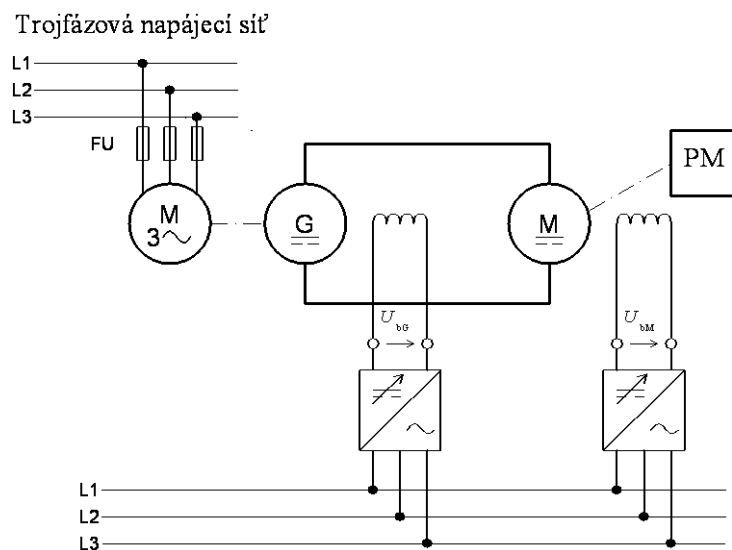
3.1. Struktura Leonardova měniče

Název tohoto měniče je odvozen od jména jeho vynálezce, kterým byl elektrotechnik Harry Ward Leonard. Tento rotační měnič patří k nejstarším měničům pro řízení stejnosměrných motorů. Jeho uplatnění bylo především v těžkých provozech (válcovací tratě, těžní stroje, atd.). Ovšem s rozvojem polovodičové techniky začal být tento měnič postupně vytlačován [1], [2].

Oproti tyristorovým měničům, jsou jeho hlavní přednosti v tom, že nemá negativní vlivy na napájecí síť. Mezi tyto přednosti patří především, že není zdrojem harmonických, nepřenáší proudové rázy a rovněž jeho účinnost je lepší než u tyristorových měničů [1], [2].

Jeho hlavní nevýhodou je nízká účinnost. Celková účinnost Leonardova měniče je dána součinem účinností tří točivých strojů, ze kterých se tento měnič skládá a pohybuje se v rozmezí $\eta = 0,55 - 0,75$ [1], [2].

Leonardův měnič se skládá z poháněcího motoru (nejčastěji asynchronního s kotvou nakrátko), jehož hřídel je mechanicky spojená se stejnosměrným generátorem. Kotva stejnosměrného generátoru je potom dále spojena elektricky s kotvou poháněného stejnosměrného motoru. Tento motor je poté již zatěžován pracovním mechanismem. Řízení otáček stejnosměrného motoru je realizováno pomocí změny buzení statorového vinutí stejnosměrného generátoru. Při rozběhu je buzení stejnosměrného generátoru na minimální hodnotě a postupným zvyšováním budicího napětí začne přes budicí obvod protékat proud požadovaný pro rozběh. V kotvě stejnosměrného generátoru se začne indukovat napětí, vlivem čehož dojde k roztočení motoru na požadovanou hodnotu otáček. Při maximálním nabuzení stejnosměrného generátoru lze dále zvýšit otáčky částečným odbuzením motoru. Změnou buzení stejnosměrného motoru nebo stejnosměrného generátoru lze tedy plynule měnit otáčky. Regulace buzení bývala dříve zpravidla odporová – odporově se řídil proud rotačního budiče, který napájel buzení motoru. Dnes se pro regulaci buzení používají polovodičové měniče. Schéma Leonardova měniče je uvedeno na obr. č. 3.1. [1], [2].



Obr. č. 3.1.
schéma Leonardova měniče

3.2. Popis polovodičového usměrňovače

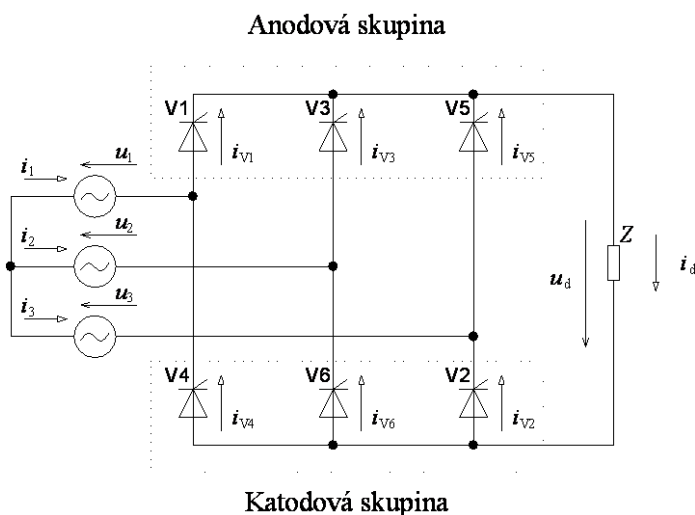
S rozvojem polovodičové techniky se v dnešní době pro regulaci stejnosměrných pohonů využívají výkonové měniče. Jejich základní rozdělení je na usměrňovače, střídače, stejnosměrné měniče a střídavé měniče (měniče kmitočtu) [11].

Usměrňovač je definován jako zařízení, sloužící pro přeměnu střídavé elektrické energie na energii stejnosměrnou. Zdrojem elektrické energie pro tento usměrňovač bývá zpravidla střídavá rozvodná síť. Velikost napětí se obvykle mění pomocí měničového transformátoru, který obvod usměrňovače od sítě také galvanicky odděluje. Usměrňovače můžeme rozdělit podle nejrůznějších hledisek, jako jsou např. podle počtu fází, podle způsobu komutace, podle druhu zapojení, podle počtu výstupních pulzů výstupního napětí atd. [7].

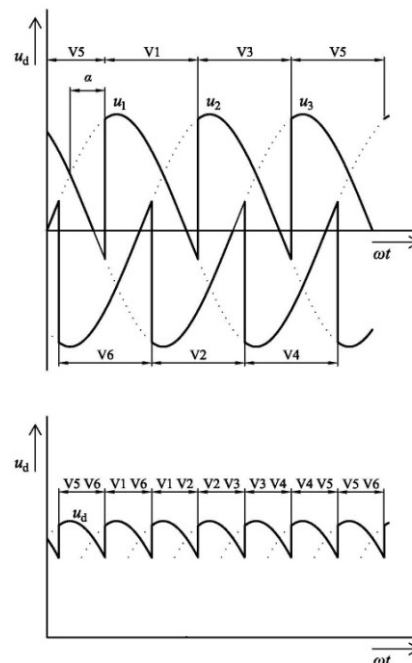
Pro osvětlení funkce usměrňovače je uveden trojfázový, můstkový, šestipulzní, řízený usměrňovač, který je na obr. č. 3.2. Usměrňovač je napájen trojfázově, skládá ze šesti tyristorů V1, až V6 v můstkovém zapojení a na výstupu je připojena zátěž. Tyristory V1, V3, V5 tvoří tzv. anodovou skupinu a tyristory V2, V4, V6 tvoří tzv. katodovou skupinu. Anodová skupina slouží, pro usměrňování kladných půlvln a katodová skupina slouží pro usměrňování půlvln záporných. Na rozdíl od usměrňovačů neřízených, v tomto případě řídíme spínání tyristorů v potřebný okamžik. Řízení se provádí nastavením tzv. řídicího úhlu α . Hodnota výstupního napětí usměrňovače je pak dána vztahem (3.1.) [7], [11], [14].

$$U_{d(av)} = U_{d0(av)} \cdot \cos \alpha = \frac{p}{\pi} \cdot U_{fm} \cdot \sin \frac{\pi}{p} \cdot \cos \alpha = \frac{6 \cdot \sqrt{6} \cdot U_f}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{6} \cdot \cos \alpha \cong 2,34 \cdot U_f \cdot \cos \alpha \quad [V] \quad (3.1.)$$

Na obr. č. 3.3. jsou výstupní průběhy napětí uvedeny pro řídicí úhel $\alpha = 45^\circ$ [11], [14].



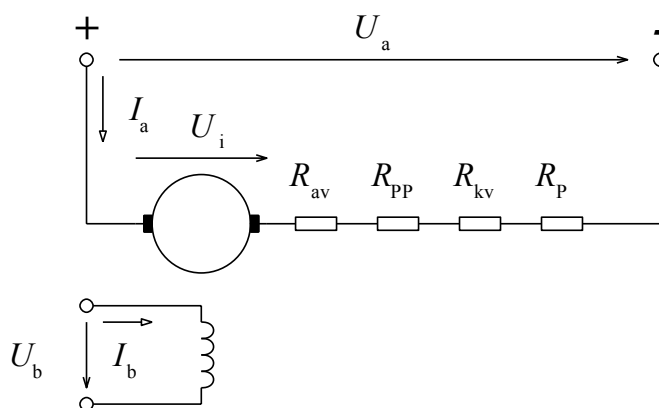
obr. č. 3.2.
schéma zapojení třífázového usměrňovače.



obr. č. 3.3.
průběhy výstupních napětí
při ohmické zátěži a řídicím úhlu $\alpha = 45^\circ$

3.3. Popis a způsob regulace stejnosměrného motoru s cizím buzením

Stejnoscsměrný motor s cizím buzením je buzen pomocí externího zdroje. V dřívější době se k buzení používal jako budič stejnosměrný generátor. Dnes se buzení většinou realizuje pomocí polovodičového měniče. Tento způsob je výhodnější z hlediska úspory energie a také se tím odstraňují časové konstanty v řídicích obvodech stejnosměrných generátorů a motorů. Budicí napětí není ovlivňováno napětím kotvy, a proto zapojení vykazuje po celou dobu stabilní otáčky i v případě kolísání napájecího napětí. Pro odvození mechanických charakteristik a způsobů regulace otáček a brzdění vyjdeme z ustáleného stavu motoru, který je zapojen dle obr. č. 3.4. [2], [5].



obr. č. 3.4
zapojení stejnosměrného motoru s cizím buzením

Ze zapojení můžeme odvodit tyto rovnice [1] :

$$U_a = U_i + (R_{av} + R_{pp} + R_{kv}) \cdot I_a \quad [\text{V}], \quad \text{kde} \quad R_{av} + R_{pp} + R_{kv} = R_a \quad [\Omega] \quad (3.2.)$$

$$U_i = \frac{p_p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot \Omega = c \cdot \Phi \cdot \Omega \quad [\text{V}] \quad (3.3.)$$

$$M = \frac{p_p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad [\text{Nm}] \quad (3.4.)$$

$$U_b = R_b \cdot I_b \quad [\text{V}] \quad (3.5.)$$

Dosazením rovnic (3.3.) a (4.4.) do rovnice (3.2.) a úpravou rovnice dostaneme vztah (3.6.) [1]:

$$\Omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi} - \frac{R_a}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M = \Omega_0 - \Delta \Omega \quad [\text{rad}^{-1}] \quad (3.6.)$$

Z rovnice (3.6.), jsou tedy dány možnosti řízení rychlosti motoru. Otáčky tedy můžeme řídit změnou napětí zdroje, změnou magnetického toku (přes změnu budicího napětí) a změnou odporu kotvy [1].

Brzdění motoru může být generátorické, do odporu nebo protiproudé [1], [2].

4. Rozbor stávajícího stavu a měření síťovým analyzátozem

4.1. Popis těžního stroje

Výdušná jáma II/3 Dolu Paskov je vybavena jedním těžním zařízením. Těžní zařízení je dvojčinné se dvěma skipovými dopravními nádobami o objemu 21m³. Těžní zařízení je používáno pro dopravu rubaniny ze 3. patra na povrch.

Těžní stroj je typového označení 4K 4016 se čtyřlanovým třecím kotoučem o průměru 4 000mm, šířky 2 434mm včetně brzdových disků. Je poháněn dvěma stejnosměrnými elektromotory o výkonu 1,8MW, napájenými ze dvou Leonardových měničů napojených v sérii. Měniče sestávají z asynchronních motorů o výkonu 2MW a řídicích stejnosměrných generátorů o výkonu 2,06MW. Drážky třecího kotouče jsou vyloženy obložením MODAR R3/MZ, odtlačné lanovnice jsou v úrovni 50,12m nad ohlubením a jejich drážky jsou vyloženy gumotextilními vložkami.

Těžní stroj je vybaven brzdovým systémem Reprimatic HR17K a diskovými brzdovými jednotkami Svenborg BSFH 515. Těžní lana jsou 4 o jmenovitém průměru 40mm, PN 02 4338.- 5 a PN 02 4338. - 6 s pozinkovanými dráty o jmenovité pevnosti 1 820MPa, jmenovité nosnosti 1 185kN. Vyrovnávací lana jsou 3 o jmenovitém průměru 45mm, PN 22-380-87.07 s pozinkovanými dráty o jmenovité pevnosti 1 080MPa, jmenovité nosnosti 947,1kN.

4.2. Popis elektrické části těžního stroje

Přívod 6kV je realizován z hlavní rozvodny dvěma nezávislými kabely. Přívod č. 1 z kobky č. 25 hlavní rozvodny a přívod č. 2 z koky č. 26 hlavní rozvodny. Systém IRODEL je skříňového provedení, je sestavený ze dvou polí se dvěma přívodními odpojovači umístěnými na boku pole rozváděče RVN irodel [3].

Přívod č. 1 je veden z pole č. 25 hlavní rozvodny a je vyveden přes máloolejový vypínač na asynchronní motor Leonardova měniče č. 1 [3].

Přívod č. 2 je veden z pole č. 26 hlavní rozvodny a je vyveden přes máloolejový vypínač na asynchronní motor Leonardova měniče č. 2. [3].



obr. č. 4.1
napájecí kobky Leonardova měniče

Jak již bylo zmíněno, těžní stroj se skládá z Leonardova měniče, který tvoří asynchronní motor a řídicí stejnosměrný generátor a dále poháněcí těžní motor.

Silové zapojení je uvedeno v Příloze I.

Pohon řídicího stejnosměrného generátoru [4]:

- asynchronní motor	: 1EMS 136 – 22 – 8
- provedení	: IP 44/e1
- výkon	: 2MW
- jmenovité napětí hlavní trojfázové sítě	: 3 x 6kV, 50Hz
- jmenovitý proud	: 224A
- jmenovité rotorové napětí	: 1 710V
- jmenovitý rotorový proud	: 700A

Řídicí stejnosměrný generátor [4]:

- typ	: 1ED 128 – 40 – 8
- výkon	: 2,06MW
- provedení	: IP 00/e1
- jmenovitý proud	: 2700A
- napětí při plném zatížení	: 750V
- jmenovité budící napětí	: 220V
- jmenovitý budící proud	: 20A

Těžní motor [4]:

- typ	: 1EEQ 280 – 55 – 16
- výkon	: 1,8MW
- jmenovité napětí	: 725V
- jmenovitý proud	: 2700A
- jmenovité budící napětí	: 220V
- jmenovitý budící proud	: 65A
- jmenovité otáčky	: 76,6min ⁻¹



obr. č. 4.2.
Leonardův měnič



obr. č. 4.3.
těžní motor

4.3. Popis současného stavu a důvodu výměny

Veškerá těžba Dolu Paskov probíhá skipem jámy II/3, která je vybavená jedním skipovým těžním zařízením typu 4K 4016, přičemž tato skutečnost velmi zásadně limituje možnosti při případných opravách a modernizacích, které nelze realizovat, aniž by proběhla výluka celého dolu.

Stav stávajících rotačních měničů, které byly vyrobeny v roce 1970, je značně neuspokojivý. I přes maximální péči a údržbu se množí poruchy, které mají za následek výpadky těžního stroje. Výjimkou nebyly ani poruchy částí soustrojí, jež měly za následek nouzový provoz celého těžního stroje v délce trvání 2 – 3 pracovních dnů.

Byť jsou na soustrojí náhradní komponenty, není tento fakt zárukou spolehlivosti provozu. Protože tyto náhradní komponenty jsou stejného stáří jako komponenty v provozu, hrozí havárie již po jejich prvním uvedení pod napětí.

Projektovaná rychlost tohoto těžního stroje je 16ms^{-1} , přičemž od roku 2009 se provozuje těžní zařízení rychlostí 12ms^{-1} . Tento provoz je prováděn s ohledem na snížený izolační stav komutátoru stejnosměrného generátoru Leonardova měniče.

Spotřeba Leonardova soustrojí ve stavu naprázdno vychází okolo 700kW. V ročních nákladech tento stav vychází okolo částky 29 400 000Kč. Roční výdaje na uhlíkové kartáče pro oba měniče se pohybují okolo 200 000Kč.

Hlavní důvody výměny tohoto zařízení jsou tedy jeho nespolehlivost a omezená funkčnost vyplývající ze stáří těžního stroje a finanční náklady, které se musí vynaložit na chod zařízení i při době jeho nečinnosti.

Výměna popisovaného zařízení je plánovaná na přelom let 2012 a 2013, kdy se počítá s výlukou.

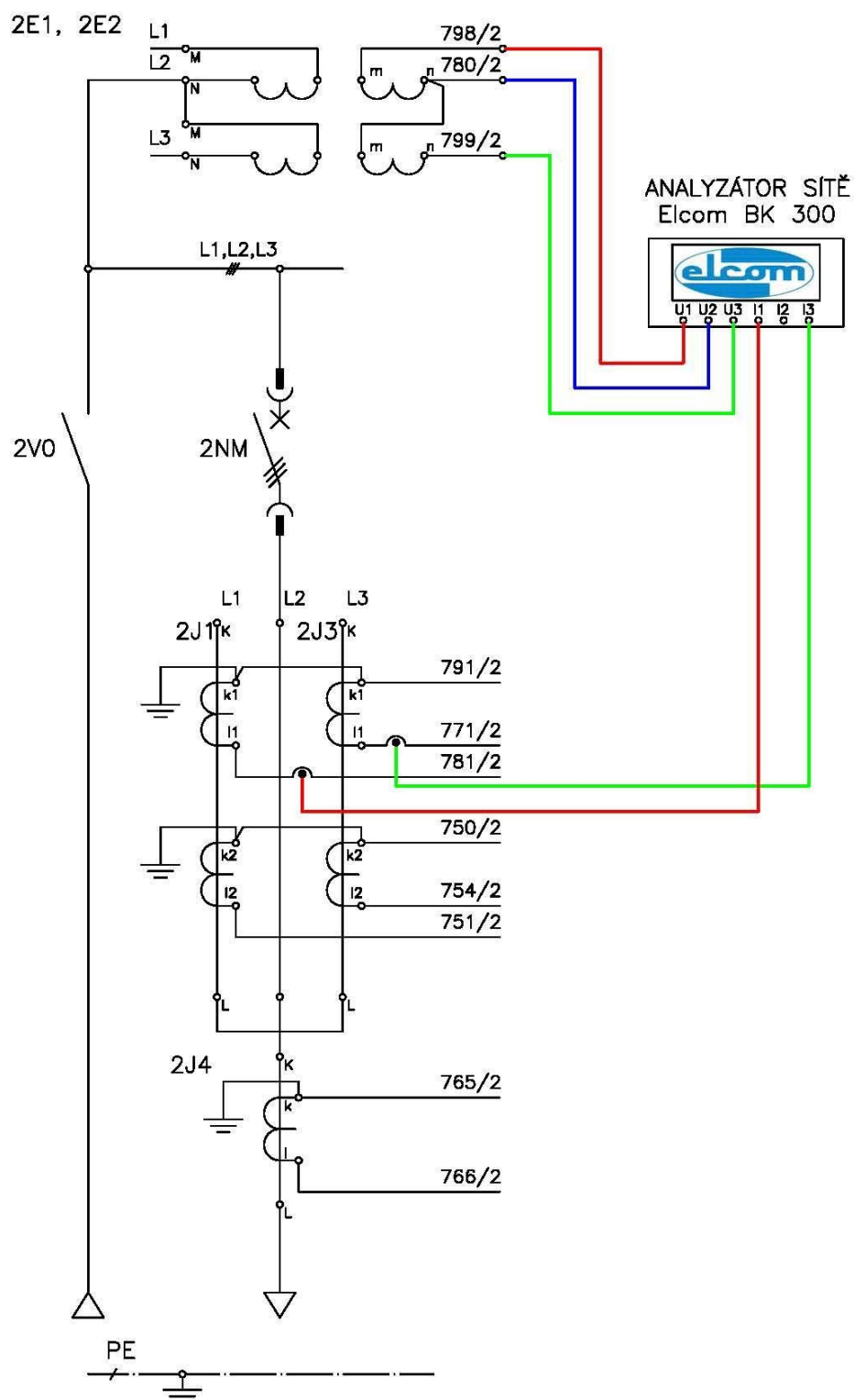
4.4. Zapojení měření

Síťový analyzátor BK Elcom 300 měřil napětí a proudy, přičemž měřicí napětěvé sondy byly připojeny k sekundárním vinutím měřicích transformátorů napětí a měřicí proudové sondy byly připojeny k sekundárním vinutím měřicích transformátorů proudů. Napětěvé sondy byly připojeny přímo pod šroubky svorek a proudové sondy byly realizovány jako měřicí kleště typu CHAVIN ARNOUX MN 71. Přehledné schéma zapojení je uvedeno na obr. č. 4.4..

Při naznačení připojení síťového analyzátoru jsem vycházel ze schématu zapojení skříně, které bylo k dispozici při měření jako dokumentace skutečného zapojení napájecích kobek Leonardova měniče. Tento elektrický rozvod umožňuje měřit tři napětí a dva proudy. Tato skutečnost je dána samotným zapojením měření proudů a napětí příslušných kobek.

Ze změřených hodnot napětí a proudů vypočetl síťový analyzátor hodnoty výkonů, harmonického zkreslení napětí a hodnoty harmonického zkreslení proudů.

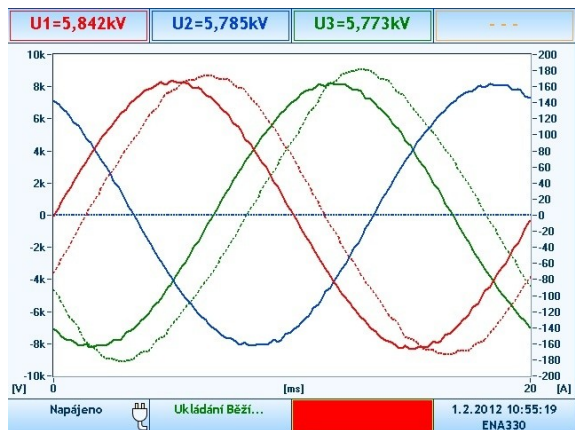
Přesnost měřicích transformátorů jsme ověřili přímo na místě. Měřicí transformátory proudů i napětí měly uvedenou třídu přesnosti 0,5. Měřicí sondy měří s přesností 1%.



obr. č. 4.4.
zapojení měření

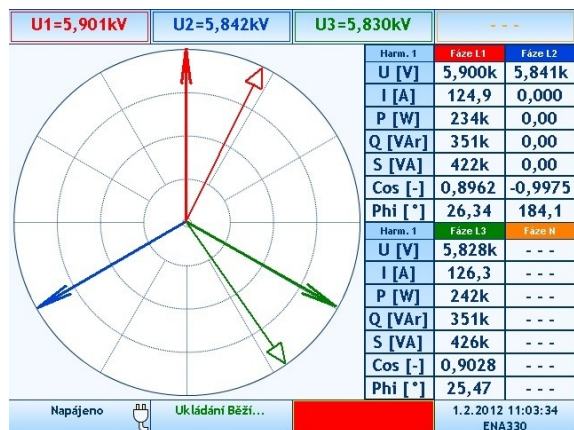
4.5. Naměřené výsledky

Na obr. č. 4.5. jsou uvedeny průběhy napájecích napětí a proudů při chodu těžního soustrojí naprázdno a na obr. č. 4.6. jsou uvedeny vektory napětí a proudů při chodu naprázdno těžního soustrojí.



obr. č. 4.5.

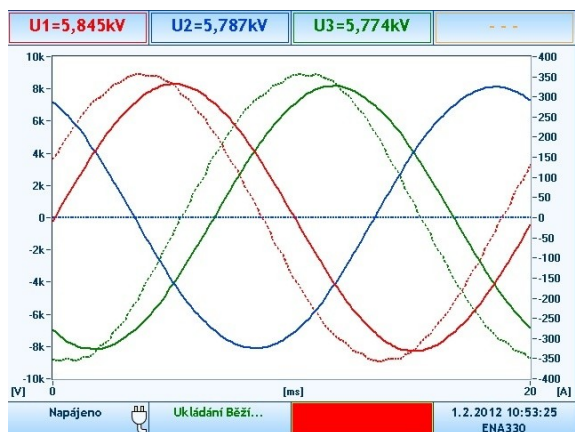
průběhy napětí a proudů při chodu naprázdno



obr. č. 4.6.

vektory napětí a proudů při chodu naprázdno

Na obr. č. 4.7. jsou uvedeny průběhy napájecích napětí a proudů při zatížení těžního soustrojí a na obr. č. 4.8. jsou uvedeny vektory napětí a proudů při zatížení těžního soustrojí.



obr. č. 4.7.

průběhy napětí a proudů při zatížení



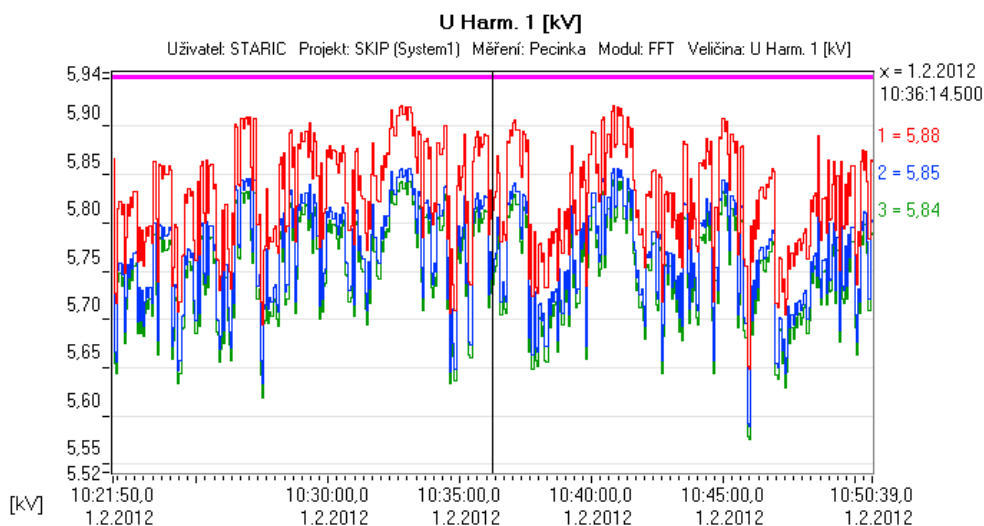
obr. č. 4.8.

vektory napětí a proudů při zatížení

Ze všech čtyř obrázků, tj. obr. č. 4.5., až obr. č. 4.8. je možné pozorovat drobné zkreslení jednotlivých průběhů napětí a proudů. Síťový analyzátor měřil sdružená napětí a proudy, a proto úhly mezi napětími a proudy vycházejí o 30° menší, než mezi sdruženým proudem a fázovým napětím.

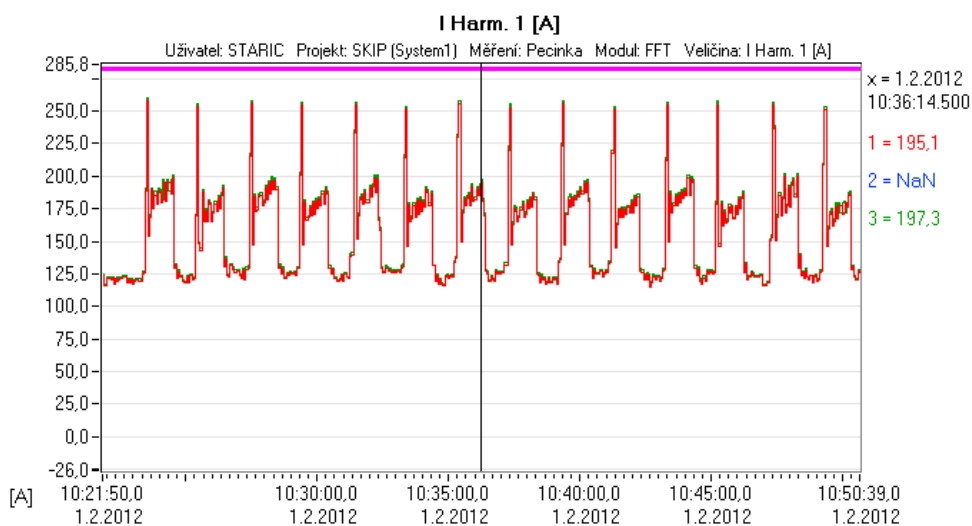
Celé měření probíhalo při cyklickém zatěžování soustrojí. Poté při analýze jsme se zaměřili jednak na stav naprázdno a stav při zatížení.

Na obr. č. 4.9. jsou vyobrazeny průběhy jednotlivých napájecích napětí při cyklickém zatěžování soustrojí. Barevné značení jednotlivých napětí souhlasí s barevným značením na obr. č. 4.5., až obr. č. 4.8. Vyobrazené průběhy v postatě ukazují, jak kolísalo napětí při zatěžování pracovními cykly soustrojí.



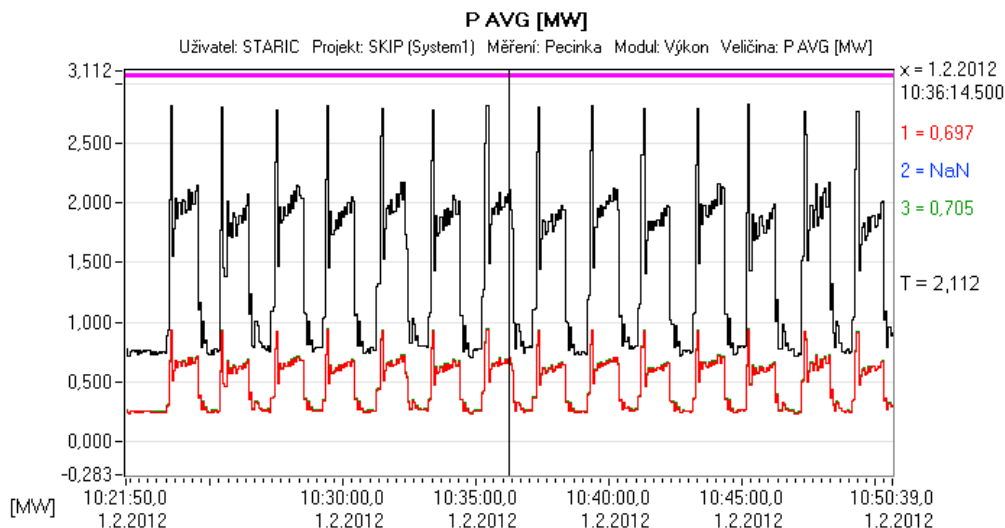
obr. č. 4.9.
 průběhy napětí při zatěžování jednotlivými cykly

Na obr. č. 4.10. jsou vyobrazeny průběhy jednotlivých proudů při cyklickém zatěžování soustrojí. Z obrázku je čitelné, kdy se soustrojí rozbíhalo (špička), poté kdy soustrojí běželo v ustáleném stavu a kdy běželo soustrojí naprázdno.



obr. č. 4.10.
 průběhy proudů při zatěžování jednotlivými cykly

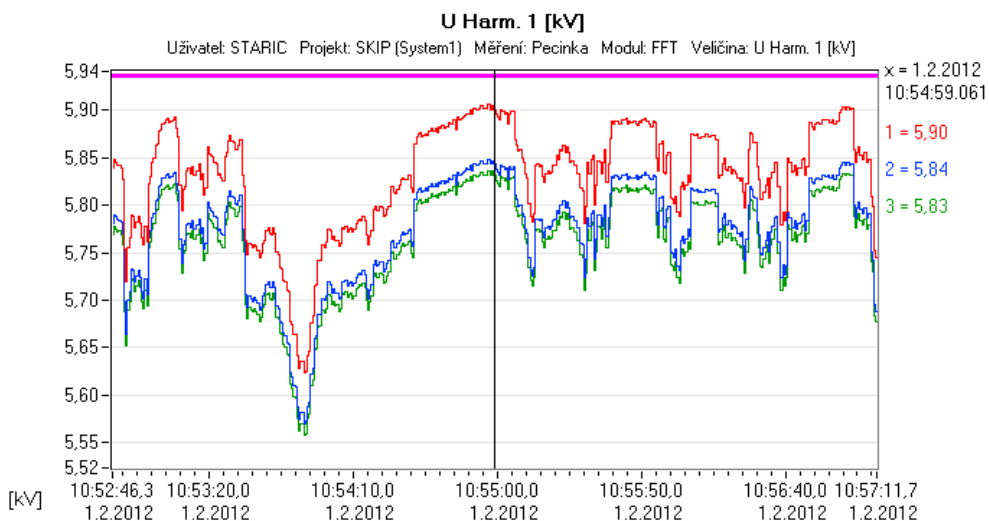
Na obr. č. 4.11. jsou vyobrazeny průběhy jednotlivých činných výkonů (červený a zelený průběh) a celkový odebíraný výkon (černý průběh).



obr. č. 4.11.
průběhy činných při zatěžování jednotlivými cykly

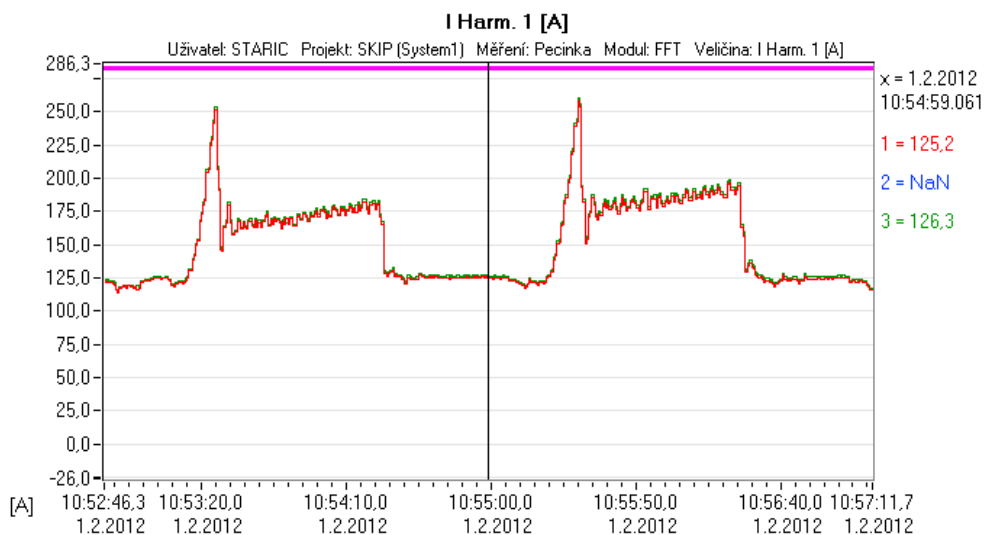
Dále jsme pro analýzu vybrali dva cykly a z nich pomocí softwaru síťového analyzátoru hodnotili parametry napětí, proudů a výkonu při chodu soustrojí naprázdno a při zatížení.

Na obr. č. 4.12. jsou vyobrazeny průběhy napětí při dvou cyklech. Zde je již patrněji vidět, jak se měnilo napětí spolu se zatížením. Nejnížší zaznamenaná hodnota napětí je 5,56kV a nejvyšší hodnota je 5,91kV.



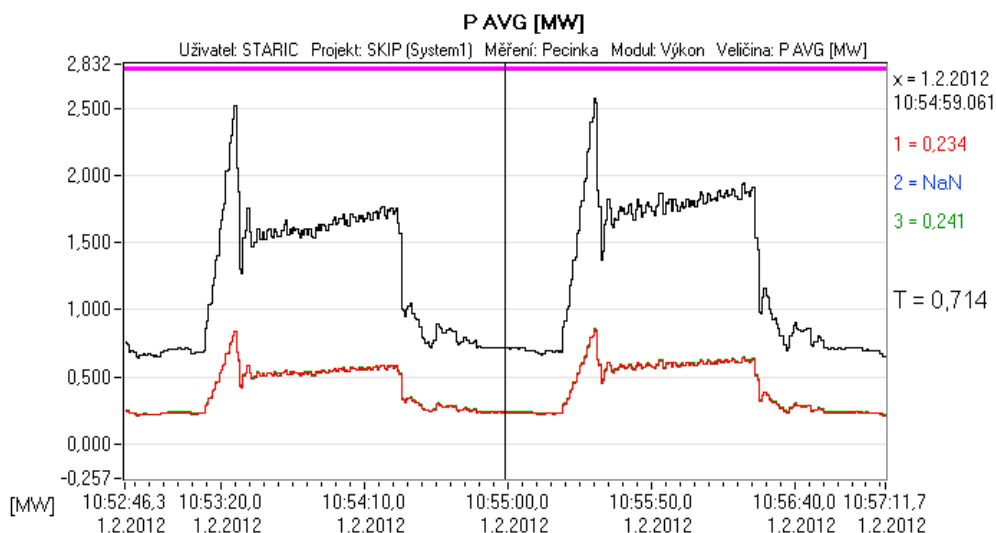
obr. č. 4.12.
průběhy napětí při dvou zatěžovacích cyklech

Na obr. č. 4.13. jsou vyobrazeny průběhy proudů při dvou cyklech. Se zatížením se proudy měnily v rozsahu od 114A, což odpovídalo stavu naprázdno, až do hodnoty 253A, tato hodnota odpovídala špičkové hodnotě proudů. Během ustáleného chodu, kdy neprobíhaly žádné výraznější změny, se hodnota proudu pohybovala okolo 175A.



obr. č. 4.13.
průběhy proudů při dvou zatěžovacích cyklech

Na obr. č. 4.14. jsou vyobrazeny průběhy činných výkonů při dvou cyklech (červený a zelený průběh). Celkový odebíraný činný výkon (černý průběh) se pohyboval v rozsahu od 694kW do 2,51MW. Tento celkový odebíraný činný výkon odpovídá výkonu odebíranému z napájecí sítě.



obr. č. 4.14.
průběhy výkonů při dvou zatěžovacích cyklech

Pomocí síťového analyzátoru jsme také zobrazili jednotlivé průběhy celkového harmonického zkreslení napětí a proudů. Maximální hodnota zkreslení napětí vychází okolo 1,5%, což je patrné i z obr. č. 4.15. Maximální hodnota zkreslení proudů se pohybuje okolo 5%. U zkreslení proudu je z obr. č. 4.16. lehce pozorovatelné že spolu se zatěžováním se klesá i zkreslení přibližně o 2,5%.

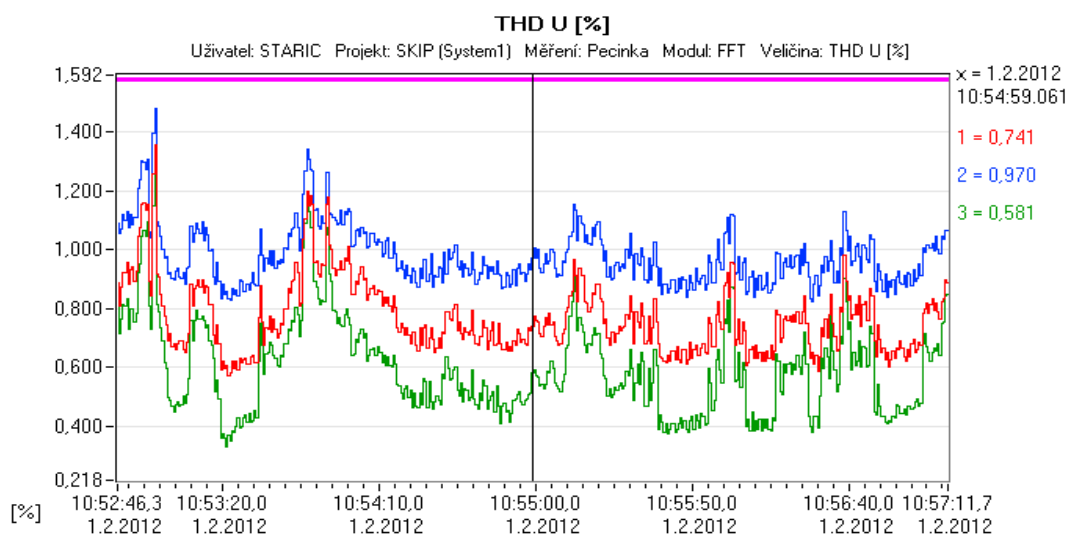
Celkové harmonické zkreslení napětí se vypočítá dle rovnice (4.1.) [8], [10].

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 [\%] \quad (4.1.)$$

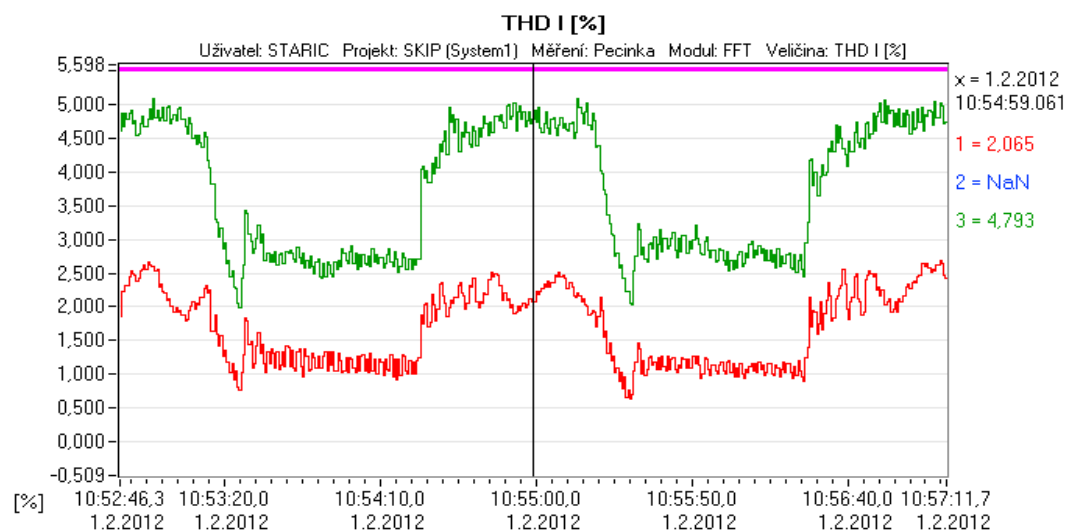
Celkové harmonické zkreslení proudu se vypočítá dle rovnice (4.2.) [8], [10].

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 [\%] \quad (4.2.)$$

Tyto dvě rovnice v postatě vyjadřují obsah harmonických v celkovém spektru harmonických vyšetřovaných veličin. Pro oba výpočty platí, že jsou dány poměrem obsahu veličiny (napětí, proudu) do padesátého řádu harmonické k efektivní hodnotě základní harmonické [8], [10].

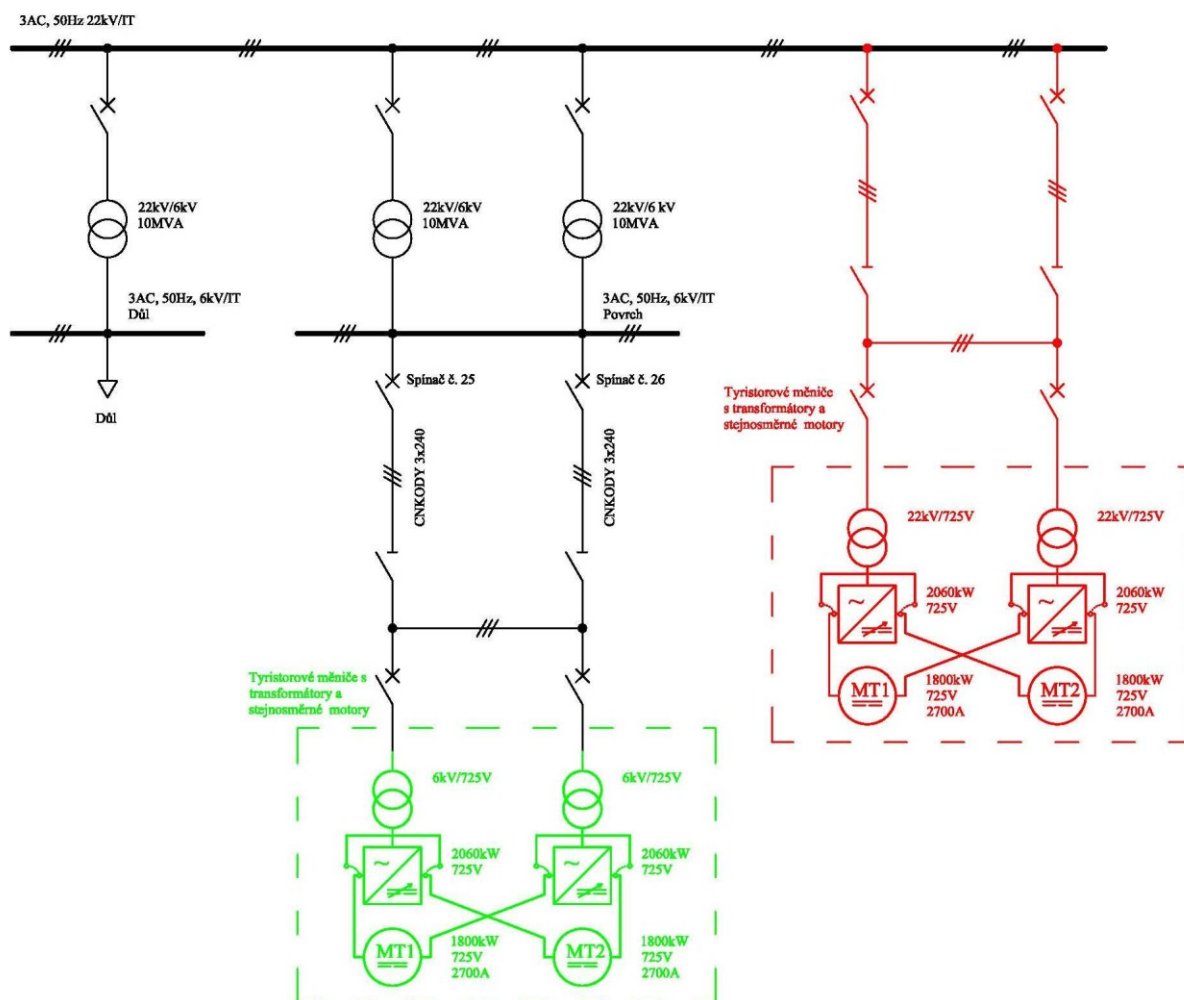


obr. č. 4.15.
průběhy celkového harmonického zkreslení napětí



obr. č. 4.16.
průběhy celkového harmonického zkreslení proudů

Jediná potřebná úprava je tedy, aby v místě, kde je v současné době připojen rotační měnič, byly připojeny transformátory, které budou snižovat napětí z hodnoty 6kV na hodnotu 725V pro tyristorové usměrňovače. Srovnání předpokládané náhrady ze sítě 22kV a ze sítě 6kV je schematicky znázorněna na obr. č. 5.2., přičemž červeně je uvedeno připojení měniče na síť 22kV a zeleně je uvedeno připojení měniče ze sítě 6kV.



obr. č. 5.2.
nový stav připojení měniče

5.2. Srovnání efektivity napájení polovodičovými měniči oproti současnému napájení Leonardovými měniči

V zadání práce je za úkol srovnat efektivity napájení polovodičovými měniči ze sítě 22kV vůči stávajícímu napájení Leonardova soustrojí ze sítě 6kV.

Ale jak již bylo uvedeno na předchozí straně, tak původní záměr se změnil z důvodů popsaných rovněž na předchozí straně. To znamená, že polovodičové měniče nebudou napájeny ze sítě 22kV.

Toto srovnání je tedy provedeno pro napájení ze sítě 6kV. Rozdíly by v podstatě spočívaly jen ve vytvoření nového rozvodu 22kV a v použití transformátorů napájených z vyšší napěťové hladiny.

Co se týče ceny, tak transformátory 22kV/725V vyjdou draže o přibližně 15% oproti transformátorům 6kV/725V.

Při vyhodnocení měření bylo zjištěno, že jedno Leonardovo soustrojí odebírá ve stavu naprázdno ze sítě výkon přibližně 700kW. Tento výkon je odebírán i v případě, že se netěží. Tato skutečnost je patrná z obr. č. 4.14., kdy černý průběh ukazuje celkový trojfázový výkon odebíraný ze sítě jedním Leonardovým měničem. Leonardovy měniče jsou celkově dva a z toho vyplývá, že celkový odebíraný výkon ze sítě se pohybuje okolo 1400kW. Pokud nahradíme tyto Leonardovy měniče za polovodičové usměrňovače, tak se dostaneme z hodnot 700kW pro jeden měnič na hodnotu okolo 106kW, která odpovídá jednomu polovodičovému usměrňovači ve stavu naprázdno a odběru naprázdno filtrační a kompenzační stanice nutné pro tento usměrňovač. Usměrňovače budou rovněž dva, a proto hodnota odebíraná ze sítě bude 212kW. Hodnota 700kW vychází z měření a hodnota 106kW je hodnota stanovená projektantem z Dolu Paskov.

Základní srovnání těchto dvou systémů můžeme provést i z porovnání účinností. U Leonardova měniče je tato účinnost dána účinností tří točivých strojů. U polovodičového měniče je tato účinnost dána v podstatě jen ztrátami na polovodičových prvcích, ztrátách na transformátorech a ztrátami v kompenzační a filtrační stanici.

Z těchto uvedených skutečností vyplývá tedy závěr, že co se týče efektivnosti napájení stejnosměrných těžních motorů, tak napájení pomocí polovodičových měničů je mnohem efektivnější. Pokud toto srovnání vyjádříme v energiích, které tyto dvě varianty odebírají ve stavu naprázdno, tak polovodičové měniče potřebují 6,6 krát méně energie z celkové energie potřebné pro chod naprázdno Leonardových měničů, toto srovnání je uvedeno v rovnici (5.1.).

$$\frac{1400}{212} = 6,6 \quad (5.1.)$$

Vyjádřeno v procentech je tato hodnota 15,14%, viz. rovnice (5.2.).

$$\frac{100}{6,6} = 15,14\% \quad (5.2.)$$

Pokud toto porovnání provedeme i ve skutečných cenách, kdy se uvažuje chod naprázdno po dobu 24 hodin denně, 350 dní v roce a při sazbě 2,5Kč za jednu kWh, tak se dostaneme z částky 29 400 000Kč na hodnotu 4 452 000Kč. Tyto dva výpočty jsou patrné z rovnic (5.3.) a (5.4.).

Chod dvou Leonardových měničů naprázdno vyjádřen v korunách:

$$2 \cdot 350 \cdot 24 \cdot 700 \cdot 2,5 = 29\,400\,000\text{Kč} \quad (5.3.)$$

Chod dvou polovodičových měničů a ztrát na filtračně kompenzační stanici ve stavu naprázdno vyjádřen v korunách:

$$2 \cdot 350 \cdot 24 \cdot 106 \cdot 2,5 = 4\,452\,000\text{Kč} \quad (5.4.)$$

Toto porovnání v podstatě můžeme provést jen teoreticky pro stav naprázdno, protože nevíme, jakou energii bude odebírat polovodičový měnič při zatěžování jednotlivými pracovními cykly. Při jednotlivých zatěžovacích cyklech se může chovat jinak než Leonardův měnič a proto odebíraná energie při těžbě může nabývat jiných hodnot. Ale ve výpočtech uvažuji v podstatě neustálý chod naprázdno tj. stejné kvantum odebírané energie bez přičtení zatížení. A proto stav naprázdno by měl být pro oba typy neměnný, v podstatě se k němu přičte jen zatěžování.

6. Vliv výměny Leonardova soustrojí za polovodičový usměrňovač

6.1. Teoretický úvod

Jedná se především o to, jak se svými zpětnými vlivy na síť bude projevovat polovodičový usměrňovač. Harmonické proudy generované tímto polovodičovým měničem jsou určitou formou znečištění elektrické sítě závodu, toto znečištění může mít za následek vážné problémy. Projevem těchto problémů může být blikající osvětlení, přehřívající se transformátory a vodiče nebo explodující kondenzátory. Tyto problémy mohou vést až k nejrůznějším výpadkům zařízení. Jelikož se jedná o důlní provoz, tak by tyto výpadky mohly být příčinou v nejhorším případě až ohrožení životů pracovníku dolu [15].

Pro posouzení vlivu můžeme využít tzv. zkratový poměr (zkratové číslo), který se uvádí rovněž v normách [8], [9]. Tento poměr je dán poměrem zkratového výkonu v místě připojení nelineární zátěže k celkovému součtu výkonů nelineárních zátěží. Dále se uvádí, že pokud je poměr menší než 100, tak zpětné vlivy budou mít velký vliv na napájecí síť, pokud bude poměr větší než 100 a menší než 200, tak bude zpětný vliv střední a pokud bude výsledkem tohoto poměru číslo větší než 200, tak zpětný vliv na síť bude nízký. Matematicky můžeme tento poměr vyjádřit pomocí rovnice (6.1.) [9], [16].

$$R_{\text{sce}} = \frac{S_{\text{sc}}}{S_{\text{tot}}} \quad [-] \quad (6.1.)$$

Kde S_{sc} je zkratový výkon v místě připojení a S_{tot} je součet výkonů všech nelineárních zátěží [16].

6.2. Zhodnocení vlivů na povrchovou a důlní síť

Jak již bylo uvedeno, tento tyristorový usměrňovač bude složený ze dvou šestipulzních usměrňovačů, přičemž každý bude mít výkon 2060kW, takže k vnější napájecí síti se budou chovat jako jeden dvanáctipulzní usměrňovač s celkovým výkonem 4120kW. Usměrňovače budou připojeny na místě stávajících stejnosměrných generátorů, které jsou poháněny asynchronními motory. Tyto asynchronní motory nejsou zdrojem pro generování harmonických proudů, jejich negativní vliv spočívá jen ve snižování účinníku. Celkové harmonické zkreslení proudů a napětí v současné době můžeme pozorovat z obr. č. 4.15. a obr. č. 4.16.. U napětí se celkové harmonické zkreslení v současné době pohybuje maximálně do 1% a celkové harmonické zkreslení proudů se pohybuje maximálně kolem 5 %.

Pro posouzení negativních vlivů na povrchovou a důlní síť bylo nezbytné zjistit zkratové výkony v místě připojení zařízení. Zkratové výkony jsou uvedeny v tab. č. 6.1.. Dále byl proveden jednoduchý výpočet podle rovnice (6.2.) a tím jsem zjistil míru vlivu zařízení na napájecí síť.

R 22kV			R 6kV / systém "A" Povrch		
S_{ks}	531,14	[MVA]	S_{ks}	269,59	[MVA]
I_{k3}	13,95	[kA]	I_{k3}	28,54	[kA]
I_{k2}	3,3	[kA]	I_{k2}	8,02	[kA]

tab. č. 6.1.
zkratové výkony a zkratové proudy

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{tot}} = \frac{269,59 \cdot 10^6}{4120 \cdot 10^3} = 65,43 \quad (6.2.)$$

Podle teorie uvedené v kapitole 6.1., bude zpětný vliv na napájecí síť tedy velký. Ve výpočtu je za S_{tot} dosazovaný výkon v kW, tato skutečnost by neměla do výsledku zavést v podstatě žádnou chybu.

Pro tento výpočet bych chtěl jen na okraj uvést variantu, že by byl polovodičový usměrňovač napájen ze sítě 22kV, s čímž počítal původní předpoklad. Tento výpočet je uveden v rovnici (6.3.).

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{tot}} = \frac{531,14 \cdot 10^6}{4120 \cdot 10^3} = 128,91 \quad (6.3.)$$

Tedy pokud by byla realizována původní varianta, tak zkratový poměr (zkratové číslo) by mělo hodnotu 128,91. Míra vlivu zařízení na napájecí síť by byla střední podle teorie uvedené v kapitole 6.1.. Dále z obou výpočtů (6.2.), (6.3.) můžeme konstatovat, že čím větší je zkratový výkon v místě připojení zařízení, tím menší bude míra vlivu na napájecí síť. V našem případě jsou tyto zkratové výkony přibližně dvojnásobné a rozdíl mezi zkratovými poměry je rovněž přibližně dvojnásobný.

Pokud celkově zhodnotíme vlivy na povrchovou a důlní síť po výměně, tak můžeme konstatovat, že když nahradíme stávající Leonardův měnič, tyristorovým usměrňovačem, tak v síti bude docházet k přechodným jevům, tyto přechodné jevy můžou mít za následek přepětí. Rovněž jak bylo popsáno výše, budou se zde nepříznivě projevovat harmonické proudy, které generuje samotný měnič.

Vliv na povrchovou síť je částečně omezen měničovými transformátory, které do určité míry omezují harmonické proudy generované měničem. Velikost harmonických proudů je ovlivňována převodem transformátoru, což se projeví i na zkreslení napětí. Co se týče důlní sítě, tak harmonické generování do ní jsou omezovány průchodem přes tři transformátory.

Vzhledem k tomu, že se jedná o dvanáctipulzní usměrňovač, složený ze dvou šestipulzních usměrňovačů, tak teoreticky dojde k eliminaci 5., 7., 17., 19., 29. a 31. harmonické. Tuto eliminaci docílíme vhodným zapojením transformátorů, kdy dojde k tomu, že tyto harmonické budou v sekundárních vinutích transformátorů vůči sobě v protifázi, a tedy se vyruší [18].

Ovšem abychom omezili tyto negativní vlivy prakticky úplně, je potřeba, aby byl tento plánovaný měnič doplněn filtrační a kompenzační stanicí.

Z informací, které máme o usměrňovačích, můžeme zjistit, které harmonické se budou nejvíce projevovat. Poté tedy pro tyto harmonické budeme navrhovat filtračně kompenzační stanici. Toto zjistíme z rovnice (6.4.), kde k je celé číslo a p je počet pulzů usměrňovače [16].

$$h = k \cdot p \pm 1 \quad (6.4.)$$

Normy uvádí, že toto posouzení harmonických, které se budou nejvíce projevovat, se provádí do harmonické 40. řádu [8].

Z toho zpětně zjistím, že při dvanáctipulzním usměrňovači je potřeba za proměnnou k , dosazovat pouze čísla 1, 2, 3. Výpočty pro jednotlivá dosazení za k jsou uvedeny v rovnicích (6.5.), až (6.7.).

Pro $k = 1$ platí:

$$h = 1 \cdot 12 \pm 1 = 11 \text{ a } 13 \text{ harmonická} \quad (6.5.)$$

Pro $k = 2$ platí:

$$h = 2 \cdot 12 \pm 1 = 23 \text{ a } 25 \text{ harmonická} \quad (6.6.)$$

Pro $k = 3$ platí:

$$h = 3 \cdot 12 \pm 1 = 35 \text{ a } 37 \text{ harmonická} \quad (6.7.)$$

Z výpočtů (6.5.), až (6.7.) můžu tedy zjistit, že zařízení, které je nutné pro eliminaci harmonických, bude třeba teoreticky navrhnout pro eliminaci 11., 13., 23., 25., 35., a 37. harmonické.

6.3. Vliv výměny na důlní síť 6kV

Důlní síť je napojena z hlavní rozvodny a je realizována na napětové hladině 6kV. Je napájena z vlastního transformátoru 22kV/6kV, takže propojení mezi důlní a povrchovou sítí je na hladině 22kV, přičemž do samotného dolu vede pět kabelů. Dále je zde větvení a propojování pro jednotlivá těžní patra.

Toto větvení znamená značnou délku kabelů. Na lokalitě Staříč je v současné době cca 50km vn kabelů. Tato délka se průběžně mění v závislosti na stěhování pracovišť v dole. Důlní síť se skládá z mnoha sérioparalelních článků, kde se uplatňuje jednak kapacita kabelů, kapacita oddělovacích kondenzátorů ve VN spínačích (v dole se používá síť IT) a indukčnost transformátorů. V dole na lokalitě Staříč je cca 90 vn spínačů a cca 110 transformátorů o výkonech 315, až 1000kVA. Důlní síť má proměnlivý charakter a napětí v síti může kolísat podle zatížení.

Větve důlní sítě jsou spínány i několikrát denně a to především z důvodu výskytu metanu. To má za následek, že při spínání vzniká přepětí. Pro omezení tohoto negativního vlivu navrhuji instalovat do větví důlní sítě svodiče přepětí, které jsou v dnešní době na takové úrovni, že nemají zásadní vliv na izolační stav sítě IT.

Harmonické generované polovodičovým usměrňovačem jsou sice omezovány průchodem přes tři transformátory, ale pro jejich eliminaci je nutná filtrační a kompenzační stanice. Proto když usměrňovač doplníme touto filtrační a kompenzační stanicí, měli bychom tím omezit negativní vlivy.

7. Návrh parametrů filtrační a kompenzační stanice k omezení vlivů na povrchovou síť

7.1. Teoretický úvod

Střídavá napájecí síť má dodávat odběrateli napětí, které bude mít sinusový průběh s předepsanou efektivní hodnotou a s předepsanou frekvencí a dále proud s efektivní hodnotou a stejné frekvenci jako napětí. Pokud na tuto síť připojíme usměrňovač, tak průběh proudu odebíraný tímto usměrňovačem nebude mít sinusový průběh. Usměrňovač tedy můžeme považovat v dalších úvahách považovat za zdroj harmonických [7].

Filtračně kompenzační stanice je zařízení, které slouží ke kompenzaci všech zpětných vlivů, které produkuje dané zařízení do napájecí sítě. Mezi tyto negativní vlivy patří především odběr jalové energie, deformace křivky napětí vlivem harmonických proudů, pokles a kolísání napětí a nesymetrie zátěže [19], [20].

Úkolem filtračně kompenzační stanice je tedy dodat potřebný kompenzační jalový výkon, přičemž dynamika musí zabezpečit pokrytí i velmi rychlých změn, omezit rušivé vlivy nelineárního spotřebiče na napájecí síť, tak aby ve společném napájecím bodě byly splněny podmínky, které jsou buď uváděny v normách, nebo které jsou sjednány s dodavatelem elektrické energie [7].

Samotné filtračně kompenzační zařízení se realizuje pomocí pasivních filtrů. Pasivní filtry se realizují vhodnou kombinací L a C . Kondenzátory se obvykle volí ze jmenovitých řad a pro tyto kondenzátory se dopočítávají velikosti reaktorů, které se poté vyrobí kusově. Tyto pasivní filtry při základní frekvenci tj. při první harmonické dodávají do sítě jalovou energii. Další jejich činnost je, že snižují obsah harmonických v napájecí síti na požadovanou úroveň [7].

Celkově se vlastní filtr skládá z několika obvodů LC . Každý tento LC obvod je naladěn na jinou vlastní frekvenci. Vlastní frekvence je frekvence, kterou chceme filtrovat. Popisované obvody se neladí přesně na frekvenci podle řádu harmonické, ale na frekvenci velmi blízkou, protože vlivem stárnutí dielektrika kondenzátorů dochází ke změně jejich kapacity a rozladování obvodu. Matematicky můžeme tuto frekvenci vyjádřit vztahem (7.1.) [7].

$$\omega_h = i \cdot \omega = \frac{1}{\sqrt{L_i \cdot C_i}} \quad [\text{rad}^{-1}] \quad (7.1.)$$

Impedance takového obvodu se pak vypočítá podle vztahu (7.2.) [7].

$$Z(h) = j \cdot h \cdot \omega \cdot L_i + \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot C_i} = j \cdot h \cdot \omega \cdot \left(L_i - \frac{1}{h^2 \cdot \omega^2 \cdot C_i} \right) \quad [\Omega] \quad (7.2.)$$

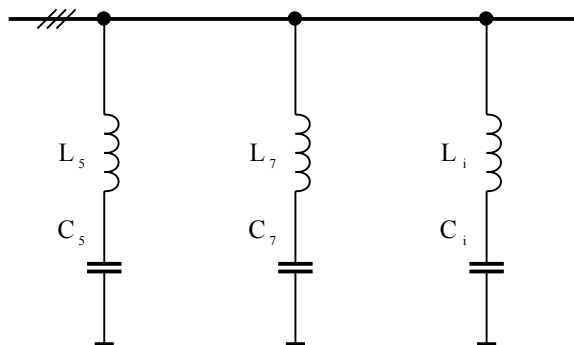
Pokud dosadíme z rovnice (7.1.) do rovnice (7.2.), tak můžeme psát rovnici (7.3.) [7].

$$Z(h) = j \cdot \omega \cdot L_i + \frac{h^2 - i}{h} = -\frac{j}{\omega \cdot C_i} \cdot \frac{i^2 - h^2}{h \cdot i^2} \quad [\Omega] \quad (7.3.)$$

Z rovnice (7.3) můžeme pozorovat, že pokud h je menší než i , tak se LC obvod chová jako kondenzátor, jestli je h větší než i , tak se obvod chová jako indukčnost a pokud se koeficienty h a i rovnají tak LC obvod má nulovou impedanci a chová se jako zkrat. V případě, že máme více paralelních LC obvodů můžeme celkovou impedanci zapsat vztahem (7.4.) [7].

$$Z_{\text{celk}} = \left(\frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_7} + \dots \frac{1}{Z_i} \dots \right)^{-1} \quad [\Omega] \quad (7.4.)$$

Na obr. č. 7.1. je uvedeno principiální schéma zapojení filtračně kompenzačního zařízení pro několik harmonických [7].



obr. č. 7.1.
schéma zapojení filtru pro několik harmonických

7.2. Návrh parametrů

Podle výpočtů (6.5.), až (6.7.), které jsou uvedeny v kapitole 6.2., je třeba navrhnout filtraci pro 11., 13., 23., 25., 35., a 37. harmonickou. V současné době návrh parametrů filtrace a kompenzace můžeme provést jen podle teoretických předpokladů, protože kromě výkonu měniče v podstatě neznáme žádné parametry měniče. Zařízení je v současné době ve fázi výběrového řízení, a proto neznám jeho parametry. Nicméně postup návrhu by byl následující [7]:

1. Podle odebíraného jalového výkonu a účinníku bych vypočítal celkový potřebný výkon pro kompenzaci na neutrální účinník. Dále bych zvolil vhodný kondenzátor, u kterého potřebuji znát jeho jalový výkon, jmenovité napětí a kapacitu.
2. Z parametru kondenzátoru bych zjistil jeho skutečný jalový výkon, který je úměrný čtverci napětí při sníženém napětí podle vzorce (7.5.). (Tento vztah platí v případě, že ke každé fázi budou zapojeny do série dva kondenzátory z toho důvodu, že jejich jmenovité napětí je nižší než napětí fázové).

$$Q_v = Q_c \left(\frac{U_f}{2 \cdot U_c} \right)^2 \quad [\text{var}] \quad (7.5.)$$

3. Z hodnoty Q_v bych pak zjistil vynásobením třemi trojfázový kompenzační výkon.
4. Z hodnoty vypočítaného trojfázového kompenzačního výkonu bych zvolil počet paralelních větví pro každou fázi s ohledem na velikost potřebného kompenzačního výkonu. Z toho zjistím

5. předběžný skutečný trojfázový kompenzační výkon, dále rovněž zjistím celkovou kapacitu C_{tot} a celkový trojfázový jmenovitý kompenzační výkon Q_{tot} .

6. Podle rovnice (7.6.) spočtu skutečný vykompenzovaný výkon.

$$Q_k = Q_{\text{tot}} \left(\frac{U_f}{2 \cdot U_C} \right)^2 \cdot \frac{h^2}{h^2 - 1} \quad [\text{var}] \quad (7.6.)$$

7. V dalším bodě výpočtu parametry reaktoru pro harmonickou řádu h . Tento výpočet provedu pomocí vzorce (7.7.).

$$L_{\text{tot}} = \frac{1}{h^2 \cdot \omega_1^2 \cdot C_{\text{tot}}} \quad [\text{H}] \quad (7.7.)$$

8. Nakonec výpočtu indukčnost v jedné fázi a to podle vzorce (7.8.).

$$L_v = \frac{1}{h^2 \cdot \omega_1^2 \cdot C_v} \quad [\text{H}] \quad (7.8.)$$

Navrhovaná indukčnost by měla být o něco vyšší, než vyjde podle výpočtu, tím se zvedne i reaktance a tím klesne poměrný kmitočet. Stárnutím kondenzátoru se snižuje jeho kapacita a zvyšuje se jeho reaktance.

Tento popisovaný postup provedu pro každou požadovanou harmonickou.

Závěrem bych chtěl jen zdůraznit, že tento výpočet není složitý a nebylo by jej zdlouhavé provádět, potřebujeme k němu jen vstupní data.

8. Závěrečné zhodnocení a ekonomická rozvaha díla

8.1. Ekonomická rozvaha díla

Díl Paskov předpokládá investiční náklady na tuto akci v hodnotě 35 000 000Kč. Přičemž tato částka byla uvedena jako požadavek do veřejného výběrového řízení. Ovšem v rámci této zakázky se nebudou měnit jen stávající Leonardovy měniče za polovodičové usměrňovače. Další plánované činnosti v rámci zakázky je náhrada regulátoru těžního stroje, náhrada záznamového zařízení těžního stroje, tzv. tachografu, náhrada zabezpečovacího zařízení těžního stroje a náhrada elektrického zařízení pomocných pohonů. Co se týče zmíněné částky 35 000 000Kč, tak v podstatě jak vyplývá z kapitoly 5.2. této bakalářské práce, do necelých dvou let by se tato investice měla sama zaplatit, protože v nákladech se z ročního provozu za 29 400 000Kč dostaneme na částku 4 452 000Kč v jednom roku, přičemž se zde jen jedná o cenu za spotřebovanou energii, bez uvažování nákladu na údržbu, kartáče a opravy.

Dále co se týče ekonomického hlediska, tak by se tímto novým zařízením měla rovněž zvýšit spolehlivost těžního stroje a s tím související snížení rizika, že veškerá těžba bude muset být zastavena.

Provádět ekonomickou rozvahu podle cen jednotlivých komponent jako např. transformátorů měničů a filtrace je velmi obtížné, hlavně z důvodu, že se jedná v podstatě o výrobky, které jsou vesměs atypické a jak jsem zjistil, tak výrobci neradi tyto ceny sdělují, pokud nemají alespoň nějakou jistotu zisku.

8.2. Závěrečné zhodnocení a zhodnocení přínosu zadavateli

Mým cílem při výběru tématu bakalářské práce bylo získat téma, které bude z praxe, abych řešil konkrétní věc a pokud možno, bude mít souvislost přímo s výkonem mého budoucího povolání. Toto se mi doufám plně povedlo. Tato práce měla pro mě velmi naučný charakter, protože bylo nutné vycházet z velkého množství materiálů jak teoretických, tak také praktických. Rovněž vidím nesmírný přínos v tom, že jsem viděl konkrétní zařízení v konkrétním provozu, takže to nebylo jako někdy ve škole, kdy se některé práce pohybují jen v rovině představ a fantazie. Rovněž musím konstatovat, že s tématem, které jsem řešil tak jsem se do té doby nesetkal a to ani okrajově. Myslím, že toto téma nepatří zrovna k nejjednodušším, ale jsem rád, že jsem ho mohl řešit a že výsledky práce budou mít alespoň nějaký přínos.

Co se týče dalšího vývoje, tak v současné době probíhá výběrové řízení na realizaci tohoto díla a jeho realizace bude provedena na přelomu let 2012 a 2013. Z toho vyplývá, že teoretický popisovaný nový stav bude možno hodnotit, až v příštím kalendářním roce. Například výpočet parametrů filtrační a kompenzační stanice sice není komplikovaný, ale bez konkrétních parametrů měniče ho nemohu konkrétně vypočítat. Jistě by bylo přínosné provést opětovné měření nového stavu a srovnat jej s hodnotami již změřenými pro starý stav. Toto porovnání by mělo přínos ze dvou hledisek. Zprvu by se mi potvrdily nebo vyvrátily předpoklady uvedené v této práci a zadruhé bychom měli pro srovnání přesné a konkrétní výsledky obou stavů.

Přínos, který tato práce bude mít pro zadavatele, vidím hlavně v tom, že se stane pomocným vodítkem při výběrovém řízení, které v současné době probíhá. A to jak pro výběr zhotovitele zakázky, tak formulaci požadavků nutných pro výběrové řízení. Další přínos vidím v cenovém zhodnocení provozu současného a budoucího. Z výpočtů v kapitole 5.2. jasné vyplývá, jak je budoucí

varianta efektivnější a v podstatě o kolik by se mělo ušetřit při výdajích za spotřebovanou elektrickou energii. Jako další věc, kterou by tato práce mohla přinést, že já jako plánovaný budoucí zaměstnanec Dolu Paskov jsem přišel do styku s touto problematikou a mám už alespoň minimální zkušenost, což by mohlo v budoucnu zkrátit čas při zaučování.

Pevně věřím, že tato práce bude mít přínos a hodnotu pro zadavatele ze všech popisovaných hledisek.

Literatura:

- [1] Čermák T.: *Elektrické pohony.*, Skriptum VŠB-TU Ostrava., Ostrava 1987.
- [2] Poliak F., Fedák V., Zboray L.: *Elektrické pohony*, Alfa., Bratislava 1987, 614 s..
- [3] VN schéma napájecí lokality.
- [4] Parametry motorů TS 1 EEQ 280-55-16, výrobce ČKD Praha.
- [5] Chmelík K.: *Stejnoseměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj*, Skriptum VŠB-TU Ostrava., Ostrava 2000.
- [6] Roubíček O.: *Elektrické motory a pohony*, BEN – technická literatura, Praha 2004, 195 s., ISBN 80 – 7300 – 092 – X.
- [7] Pavelka J., Čeřovský Z., *Výkonová elektronika*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [8] Norma ČSN EN 61 800 – 3 ed.2, *Systém elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí – Část 3: Požadavky EMC a specifické zkušební metody*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1.10. 2005.
- [9] Norma ČSN EN 61 000 – 3 – 12, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3 – 12: Meze harmonických proudů způsobených zařízením se vstupním fázovým proudem $> 16\text{ A}$ a $\leq 75\text{ A}$ připojeným k veřejným sítím nízkého napětí*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1.10. 2005.
- [10] Norma ČSN EN 61 000 – 2 – 4 ed.2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 2 – 4: Prostředí – Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v průmyslových závodech*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1.7. 2003.

Internetové stránky:

- [11] FEI – VŠB [online], [cit. 2 – 4 – 2012] *Výkonová elektronika I*. Dostupné z WWW: http://homen.vsb.cz/~hav278/VPS1/Studijni_opory/Vykonova_elektronika_1.pdf
- [12] *elektrika.cz* [online], [cit. 2 – 4 – 2012] *Princip stejnosměrných motorů*. Dostupné z WWW: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru>
- [13] PED - MUNI [online], [cit. 3 – 4 – 2012] *Stejnoseměrné stroje*. Dostupné z WWW: http://www.ped.muni.cz/wtech/elearning/ELE/Stejnosmerne_stroje.ppt

- [14] *MTI - TUL* [online], [cit. 5 – 4 – 2012] *Měniče*. Dostupné z WWW:
<<http://www.mti.tul.cz/files/vke/menice.pdf>>
- [15] *odbornecasopisy.cz* [online] ,[cit. 7 – 4 – 2012] *Harmonické – lepší prevence, než náprava*. Dostupné z WWW:
<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27733>
- [16] *FEI – VŠB* [online], [cit. 10 – 4 – 2012] *Zpětné vlivy měničů*. Dostupné z WWW:
<http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/7_Zpetne_vlivy_menicu.pdf>
- [17] *FEI – VŠB* [online], [cit. 10 – 4 – 2012] *Možnosti pro omezování harmonických*. Dostupné z WWW:
<http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/8_Moznosti_pro_omezovani_harmonickych.pdf>
- [18] *FEI – VŠB* [online], [cit. 10 – 4 – 2012] *Možnosti pro omezování harmonických II*. Dostupné z WWW:
<http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/9_Moznosti_pro_omezovani_harmonickych_II.pdf>
- [19] *ČKD* [online], [cit. 12 – 4 – 2012] *Filtračně kompenzační zařízení*. Dostupné z WWW:
<<http://www.ckde.cz/translate/cs/company-detail/ckd-elektrotechnika/ckd-elektrotechnika/filtracne-kompenzacni-zarizeni/23>>
- [20] *MILOŠ MOLNÁR* [online], [cit. 12 – 4 – 2012] *Kompenzace*. Dostupné z WWW:
<<http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>>

Seznam příloh:

Příloha I

SILOVÁ ČÁST POHONU TS 4K 4016

A3